

В. В. АВЕРЬЕВ

**УСЛОВИЯ РАЗГРУЗКИ ПАУЖЕТСКИХ ГИДРОТЕРМ
НА ЮГЕ КАМЧАТКИ**

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в ряде государств (Италия, Новая Зеландия, Советский Союз) развернулись изыскания по использованию высокотемпературных природных вод и паров в энергетических целях. Объектами промышленного освоения стали мощные современные месторождения гидротерм в вулканических областях, обеспечивающие расходы горячей воды и пара в сотни килограммов в секунду. В их недрах, вскрытых буровыми скважинами, температуры достигают нескольких сотен градусов.

Материалы, полученные при разведке этих месторождений, существенно касаются гидротермального процесса, а следовательно, позволяют лучше разобраться в процессах формирования месторождений полезных ископаемых, обязанных своим происхождением древним гидротермам. В связи с этим они нуждаются в тщательном и всестороннем изучении именно с геологических позиций.

В Советском Союзе работы по использованию подземного тепла в энергетических целях были начаты в 1957 г. на юге Камчатки, на базе Паужетских термальных источников¹. Последние являются типичными представителями той группы высокотемпературных гидротерм, в которую входят также гейзеры Камчатки и Исландии, источники Йеллоустонского парка (США), термы Новой Зеландии, Японии и многие другие. Одной из характерных черт этой группы является однотипный химический состав, главную роль в котором играют хлористый натрий—до 5 г/л и метаборная и кремневая кислоты с концентрациями, измеряемыми сотнями миллиграммов в литре. Благодаря тому обстоятельству, что температура указанных гидротерм на глубине значительно превышает 100°, их выход на поверхность сопровождается обильным выделением пара.

Паужетское месторождение, расположенное вблизи вулканов Кочелова и Камбального, находится в районе с исключительно богатой и разнообразной гидротермальной деятельностью. В районе известны горячие углекислые и сероводородные источники; в кратерах вулканов и на Камбальном хребте выходят многочисленные паровые струи. Однако Паужетские источники представляют собой наиболее мощный очаг разгрузки: суммарный расход термальной воды, имеющей на глу-

¹ Работы по разведке и изучению Паужетского месторождения производятся совместно Министерством геологии и охраны недр СССР и Академией наук СССР.

бине температуру 170—190°, достигает здесь 100 л/сек. Гидротермы района неоднократно посещались различными исследователями (Набоко, 1954; Пийп, 1937), давшими детальные описания условий их выхода. Эти данные, полученные в результате полевых наблюдений, в настоящее время дополняются новыми материалами благодаря проведенному разведочному бурению.

На первом этапе разведки Паужетского месторождения в 1957—1959 гг., помимо полевых геологических исследований, было проведено бурение одной 800-метровой роторной и нескольких колонковых скважин глубиной 250—300 м. Изучение месторождения далеко еще не закончено, поэтому автор не ставил своей целью дать его всестороннюю характеристику.

В настоящей статье выносятся на обсуждение новые сведения, полученные при разведке, которые должны способствовать более правильному пониманию процессов, происходящих при выходе высокотемпературных гидротерм на поверхность. Эти сведения касаются особенностей геологической обстановки очага разгрузки, характера движения гидротерм и некоторых моментов их химической дифференциации.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Породы, слагающие район

Место выхода Паужетских источников приурочено к ооласти троговой впадины, образовавшейся в раннечетвертичное время (рис. 1). Эта впадина, имеющая ширину около 25 км, находится примерно в равном

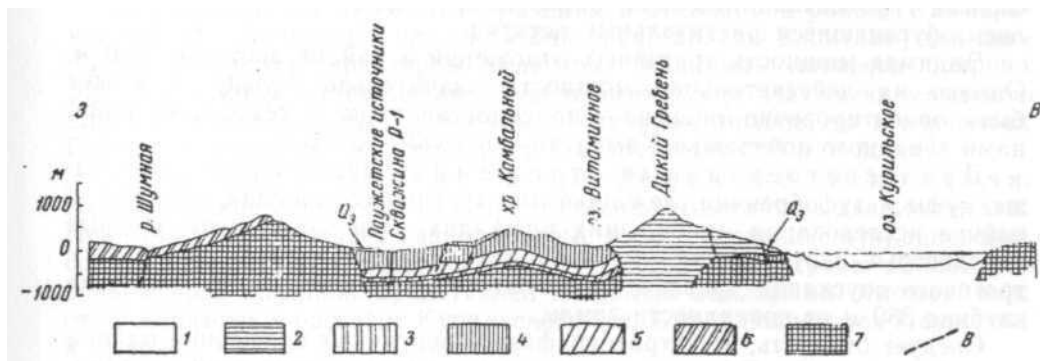


Рис. 1. Схематический геологический разрез через район Паужетских источников на Южной Камчатке. Составил В. В. Аверьев по данным маршрутных исследований 1957—1958 гг. и материалам предыдущих работ.

1 — верхнечетвертичный осадочный комплекс — аллювий высоких террас речных долин и Курильского озера: пемзовые отложения, пески, галечники (Q_3); 2 — верхнечетвертичный экструзивный комплекс дациты хребта Дикий гребень (Q_3); 3 — верхний комплекс среднечетвертичных отложений: дациты, андезиты, базальты (Q_2^2); 4 — нижний комплекс среднечетвертичных отложений: агломератовые и пеплорые туфы андезитового и дацитового состава («озерные отложения») (Q_2^1); 5 — верхний комплекс древнечетвертичных отложений: кристаллокластические туфы кислых лав, игнимбриды (Q_1^2); 6 — нижний комплекс древнечетвертичных отложений: базальты, андезиты, туфобрекчии (Q_1^1); 7 — третичные отложения (нерасчлененные): основные лавы и их туфы; туфопесчаники, алевролиты (Pg + N); 8 — разломы

удалении от Охотского моря и Тихого океана, занимая, таким образом, центральное положение на южной оконечности Камчатки. Окружающие трог плоскогорья высотой до 1000 м сложены с поверхности древнечетвертичными лавами и в основании — третичными отложениями. Сама

же область трога выполнена четвертичными туфами, перекрытыми молодыми излияниями лав.

Третичные отложения. Наиболее древними в районе являются третичные отложения олигоцен-миоценового возраста. Их выходы наблюдаются в основании бортов трога: на востоке — на восточном и южном берегах Курильского озера, на западе — в левом борту долины р. Паужетки, на севере — в правом борту долины р. Озерной. В области трога третичные отложения не выходят на дневную поверхность; по данным бурения на Паужетских источниках, их кровля находится на 650 м ниже поверхности земли.

На западном и северном бортах трога третичные отложения представлены вулканогенным комплексом пород. Здесь в строении разреза принимают участие черные оливиновые базальты, переслаивающиеся с серозелеными туфами основного состава и туфобрекчиями. На западном борту долины Паужетки в верхней части разреза отмечаются опоквидные пепловые туфы основного состава и светлые алевролиты нормального осадочного облика; однако эти породы выдержаны по простиранию лишь на несколько сотен метров. В восточной части района исследования третичные породы представлены преимущественно зеленовато-серыми грубозернистыми туфопесчаниками. На южном берегу Курильского озера в них была обнаружена фауна, относящаяся к олигоцену — нижнему миоцену. До настоящего времени эта находка является по существу единственным объективным возрастным критерием для всего комплекса третичных отложений района. В области троговой впадины верхняя часть разреза третичных отложений, вскрытая скважиной, представлена серыми туфопесчаниками и алевролитами, в которых местами сохранились обуглившиеся растительные остатки.

Видимая мощность третичных отложений в районе достигает 800 м. Однако их действительная мощность значительно больше и может быть ориентировочно оценена — по сопоставлению с северными районами западного побережья Камчатки — в 7000—10 000 м.

Древнечетвертичные отложения. Древнечетвертичные лавы, туфы и туфобрекчии, лежащие на третичных породах, развиты в районе исследования на больших площадях. Они формируют лавовые плоскогорья, окружающие трог с запада, севера и востока. В области трогового опускания древнечетвертичные породы вскрыты бурением на глубине 380 м от поверхности земли.

Следует отметить, что стратиграфия четвертичных отложений района разработана слабо. Объективные критерии, позволяющие точно датировать возраст пород, отсутствуют. В настоящее время ясны лишь взаимоотношения отдельных комплексов пород. В связи с этим, проводящееся ниже возрастное деление является в значительной мере условным и может быть изменено после получения дополнительных материалов.

Древнечетвертичные отложения подразделяются на два разновозрастных комплекса, резко отличающихся друг от друга по литологии. Нижний комплекс представлен лавами и туфобрекчиями основного, преимущественно андезитового, состава. Эти породы распространены главным образом в западной части района, прилегающей к Охотскому морю. Мощность их нарастает в западном направлении, достигая вблизи Охотского побережья 600—800 м. К верхнему комплексу относятся витрокристаллокластические туфы дацитов, развитые в основном на севере, где они лежат непосредственно на третичных породах. На западном побережье туфы кислых лав слагают отдельные небольшие участки, залегающие на андезитах. В долине Первой Речки в толще туфов фиксируется 30-метровая пачка игнимбригов. В районе исследования мощность

дацитовых туфов составляет около 200 м, однако к северу она значительно увеличивается.

Среднечетвертичные отложения. К среднечетвертичным отложениям относится мощная толща туфов, перекрытых лавовыми покровами. Область их распространения ограничивается троговой впадиной; в соседних районах отложения этого типа не встречаются, а их возрастные аналоги пока еще не установлены. Толща туфов обнажается на северном окончании Камбального хребта, а также в его осевой зоне. Выходы ее наблюдаются от Паужетки на западе до берегов Курильского озера на востоке и от р. Озерной на севере до верхнего течения р. Паужетки на юге. Таким образом, среднечетвертичные туфы слагают весьма обширную территорию. Однако в районе Камбального хребта они покрыты почти сплошным чехлом лав, так что туфовая толща обнажается здесь только по глубоким эрозионным врезам.

Наиболее полные данные о разрезе среднечетвертичной туфовой толщи дало бурение, которое вскрыло в ней три крупные пачки пород. Нижняя пачка представлена андезито-базальтовой туфобрекчией темно-бурого цвета мощностью 110 м. В среднюю пачку входят зеленовато-серые агломератовые туфы андезитового и андезито-дацитового состава, содержащие прослои туфобрекчии и туфоконгломератов. Мощность пачки 220 м. Верхи туфовой толщи сложены светло-серыми пепловыми туфами дацитового состава и туффитами, мощность которых достигает 100 м. Эти породы в ряде мест обладают отчетливой тонкой слоистостью, указывающей на формирование их в условиях озерных бассейнов. Суммарная мощность среднечетвертичных туфов, таким образом, составляет около 430 м.

Перекрывающие туфы лавы развиты в основном в районе Камбального хребта. В северной его части они представлены дацитами, для южной части хребта характерны андезиты. Мощность лавового покрова растет в южном направлении. Если в низовьях р. Паужетки мощность дацитовых лав измеряется первыми десятками метров, то в верховьях Паужетки толщина андезитового чехла достигает 200 м и более.

Верхнечетвертичные и современные отложений. Породы верхнечетвертичного возраста подразделяются на два комплекса. Первый из них включает разнообразные лавы, слагающие вулканические сооружения района — сопки Камбальную, Кошелева и хребет Дикий гребень; второй комплекс представлен мощными пемзовыми отложениями, отлагавшимися в бассейне Курильского озера, и аллювием рек Паужетки и Озерной.

В строении конуса Камбального вулкана принимают участие андезиты, переслаивающиеся с толщами вулканических брекчии, туфов и шлаков того же состава. Массив вулкана Кошелева в восточной части сложен основными пироксено-плагиоклазовыми андезитами с прослоями и линзами красновато-бурых туфов. В западной более древней части массива развиты серые, менее основные, андезиты и туфобрекчии. Молодые лавовые потоки вулканов Кошелева и Камбального представлены андезито-базальтами и шлаками основного состава. Значительные массивы горных пород на вулкане Кошелева превращены в глины и алунизированы под воздействием фумарол. Таков участок в верховьях р. Шумной, где активно проявляется современная гидротермальная деятельность. На северном склоне вулкана, в местах существования фумарол в прошлом, отдельные конусовидные вершины сложены целиком измененными, алунизированными, породами.

Одно из самых молодых вулканических сооружений района — вулкан Дикий гребень — характеризуется излиянием кислых лав дацитового состава. Такой же состав имеет лава, экструдировавшая по трещинам и

образовавшая гребни, отходящие от вулкана в северо-западном, юго-восточном и восточном направлениях.

С излиянием и экструзией кислых лав связано образование мощных пемзовых толщ. Наибольшее развитие они имеют на западных берегах Курильского озера и в истоках р. Озерной, в непосредственной близости от Дикого гребня. Пемзовые туфы, слагающие указанную толщу, достигают здесь мощности 100 м. Вниз по долине р. Озерной мощность пемзовых отложений снижается и в них заметнее проявляются черть. переотложения. В долине р. Паужетки пемза почти целиком является переотложенной. Она входит в состав аллювиальных свит высоких террас, располагаясь в верхних частях разрезов. Мощность пемзовых отложений здесь не превышает 10 м.

Аллювий низких террас и поймы рек Озерной и Паужетки представлен в основании валунно-галечниковым материалом и в верхних горизонтах — гравийно-песчаным. Мощность аллювиальных свит в низких террасах — 8—10 м.

Тектоника и вулканизм

В тектоническом отношении район исследования неоднороден. Выделяются две области: в центре—область трогового опускания, для которой характерны интенсивные дифференцированные движения четвертичного времени и сопряженный с ними молодой вулканизм; по окраинам — относительно консолидированные блоки горных пород, представляющие собой остатки структуры, формирование которой закончилось к древнечетвертичному времени.

Слои третичных пород, выходящие в естественных обнажениях на северном берегу р. Озерной и на восточном берегу Курильского озера, лежат без видимого наклона. Далее на восток они характеризуются углами падения 20—45°. На западе, судя по крутому падению контакта третичных отложений с древнечетвертичными лавами, толща наклонена на запад и северо-запад. При этом, наибольший наклон — до 20° — наблюдается вблизи долины р. Паужетки; по направлению к Охотскому морю слои выполаживаются.

Таким образом, некогда существовавшая структура была крупным поднятием, образование которого связано, вероятно, с общим воздыманием Камчатки в конце неогена.

В начале четвертичного периода эта структура была захвачена сильнейшими тектоническими нарушениями, в результате которых сводовая часть ее на обширной территории просела, образовав трогообразную впадину субмеридионального простирания шириной 20—25 км. Амплитуда проседания, установленная бурением по подошве древнечетвертичных лав, достигает 1000 м. Одновременно с образованием трога (возможно, несколько позже) в древней структуре возникли относительно узкие, в общем прямолинейные зоны прогибания, в которых третичные отложения нигде не появляются на дневную поверхность. Эти зоны ориентированы в северо-восточном и северо-западном направлениях. К одной из них — северо-западной — приурочены вулканы Камбальный, Ильинский и Желтовский. Ко второй зоне — северо-восточной — вулканы Камбальный и Кошелева.

В начале среднечетвертичного времени, в период накопления 400-метровой толщи туфов, прогибание трога прогрессировало. Однако впоследствии, одновременно с излиянием среднечетвертичных лав, центральная часть его начала испытывать поднятие, которое к верхнечетвертичному времени оформилось в виде антиклинальной структуры Камбального хребта. О масштабах поднятия можно судить по залеганию тонкослои-

стых туффигов: в нижнем течении р. Паужетки они выходят на отметке ниже 100 м, в Камбальном хребте, в северной части осевой зоны, фиксируются на высоте более 1000 м.

Структура Камбального хребта вытянута в меридиональном направлении примерно на 18 км и имеет ширину 8—12 км, т. е. представляет собой крупную брахиантиклиналь. Наиболее отчетливо — и морфологически, и структурно — выделяется ее западное крыло. Это хорошо выраженная моноклиналь, имеющая падение на запад с наклоном 20—25°. Близ основания моноклиналь разбита крупным меридиональным разломом, по которому в настоящее время заложена долина Правой Паужетки. Восточное крыло структуры характеризуется меньшим наклоном — до 15°, но оно значительно более сильно захвачено разрывными тектоническими нарушениями. Обширный участок сброшен вниз на несколько сотен метров. Это нарушение было связано, по-видимому, с образованием молодой впадины, где впоследствии произошла экструзия Дикого гребня. В северной части хребта обрушение захватило не только восточное крыло структуры, но также ее осевую зону и даже частично западное крыло, судя по тому, что на восточном склоне хребта наблюдаются слои туффигов, имеющие наклон на запад.

Структура Камбального хребта оканчивается на севере периклинально: в то время как слои туфов, выходящие в долине р. Паужетки, падают на северо-запад 315—330° под углом от 7 до 15°, те же отложения, выходящие близ озера Витаминного, имеют примерно такой же наклон на северо-восток. Относительно пологое падение слоев на северо-западном окончании поднятия осложнено системой взбросов северо-восточного простирания, образовавших структурные ступени высотой в несколько десятков метров, хорошо выраженные в рельефе.

В южной части строение антиклинали осложняется, так как к ней оказываются приуроченными кратеры древних вулканов Камбального хребта. Очаги извержений, которые устанавливаются по периклинальному залеганию лав и туфобрекчий, с течением времени мигрировали к югу. В этом же направлении возрастала мощность излияний, завершившихся образованием 2-километрового конуса Камбального вулкана. Этот вулканический массив, резко возвышаясь над окружающей местностью, замыкает с юга Камбальный хребет. Таким образом, вулканизм Камбального хребта исторически и структурно связан с молодым тектоническим поднятием. Можно полагать поэтому, что положительная температурная аномалия, существующая в недрах Камбального вулкана, в какой-то степени распространяется также на всю структуру Камбального хребта.

С воздыманием Камбального хребта было сопряжено образование впадин по его периферии. На западе и на севере оформились впадины, занятые в настоящее время долинами рек Паужетки и Озерной. Обе эти впадины являются по существу реликтовыми, представляя собой участки трогового понижения, не вовлеченные в поднятие. К востоку от Камбального хребта эволюция шла более сложными путями. Вслед за обрушением восточного крыла поднятия последовала экструзия дацитовых лав Дикого гребня, образовавшая горный массив неправильных очертаний. Длинная ось этого массива, протяженностью около 12 км, вытянута в северо-западном направлении. Центром массива является гора Неприятная; от нее на северо-запад, юго-восток и восток отходят невысокие горные хребты, гребни которых созданы беспорядочным нагромождением глыб дацитовых лав. Изучение аэрофотоснимков позволяет наметить в северо-западном и восточном хребтах разломы концентрического типа, возникшие, возможно, при застывании лавы. Между горным массивом Дикого гребня и восточными отрогами Камбального

хребта образовалась узкая депрессия северо-западной ориентировки, еще далеко не сnivelированная.

История восточной окраины трога, к которой приурочена впадина Курильского озера, пока что не расшифрована достаточно определенно. Можно лишь предполагать, что указанная впадина, унаследованная от древнего трогового понижения, значительно омоложена более поздними тектоническими движениями.

Таким образом, развитие трога в четвертичный период привело к довольно сильной его дифференциации, в нем возникли, с одной стороны, тектонические и вулканические поднятия, из которых главная роль принадлежит структуре Камбального хребта, и, с другой — молодые впадины. Тектоническая подвижность и очаги вулканизма с течением времени перемещались в восточном и южном направлениях. Западная и северная окраины отрога, занятые долинами рек Паужетки и Озерной, в этом отношении представляются значительно более пассивными участками. Следует отметить также, что область трога в целом еще далеко от своей консолидации. Об этом свидетельствуют зарегистрированные Паужетской сейсмической станцией местные землетрясения, эпицентры которых оказываются приуроченными, в частности, к южной части Камбального хребта.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПАУЖЕТСКИХ ИСТОЧНИКОВ

В области трога, наряду с вулканизмом, сосредоточены также почти все проявления гидротермальной деятельности района. Центром этой деятельности является антиклинальная структура Камбального хребта,

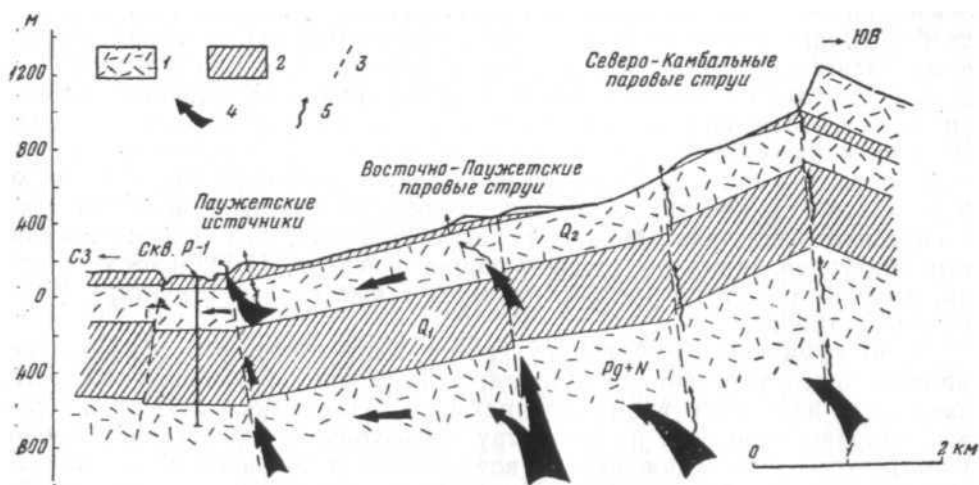


Рис. 2. Схема разгрузки Паужетских гидротерм.

1 — обводненные породы; 2 — относительные водоупоры; 3 — разломы; 4 — вода; 5 — пар

к сводовой части которой приурочены многочисленные выходы паровых струй. Паужетские источники находятся у северо-западного подножья этой структуры, располагаясь в тальвеге долины р. Паужетки (рис. 2). Выход гидротерм на поверхность именно на этом участке обусловлен благоприятным сочетанием двух факторов: низким гипсометрическим положением места выхода (абс. отм. 100 м) и тектонической раздробленностью западного крыла антиклинали.

Разгрузка Паужетских гидротерм происходит из агломератовых туфов среднечетвертичного возраста. По данным разведки, они являются наиболее обводненными. Эти туфы можно рассматривать как водоносный комплекс, заключенный между двумя практически водонепроницаемыми толщами. Верхним водоупором являются пепловые туфы, нижним — плотные андезитовые туфобрекчии. Циркуляция термальной воды осуществляется, главным образом, по трещинам, так как фильтрационные свойства самих туфов весьма низкие (коэффициент фильтрации в пределах 0,01 м/сут). Выход гидротерм на поверхность происходит также в основном по крупным трещинам и хорошо разработанным каналам. Все большие пароводяные источники хорошо разработанным каналом. (№ 1, Пульсирующий и Парящий № 2) и подавляющая часть скрытых выходов сконцентрированы в полосе шириной несколько десятков и протяженностью около 200 м. Эта полоса связывается с зоной разлома, дробящего туфовую толщу и приуроченного к подножью высокой правобережной террасы р. Паужетки. В скважинах, пробуренных в этой зоне, фиксируются наибольшие расходы пароводяной смеси — до 40 кг/сек.

Однако высокотермальные воды не могут формироваться в среднечетвертичной туфовой толще, слагающей верхнюю часть разреза в области трога. Эта толща является не более как крупным коллектором, принимающим термальные воды из залегающих глубже третичных отложений. Об этом свидетельствует, в частности, принципиальное сходство химического состава вод из четвертичных туфов и третичных песчаников, вскрытых роторной скважиной (Р-1) (рис. 3). Как те, так и другие представляют собой хлоридно-натриевые воды с минерализацией 2,7—3,1 г/л, содержащие метаборную кислоту в количестве 120—150 мг/л и кремневую в количестве 140—190 мг/л. Поступление высокотермальных вод из третичных отложений в четвертичные происходит, по-видимому, по системе тектонических нарушений на северо-западном окончании антиклинальной структуры Камбального хребта. Возможно, также, что часть воды подводится непосредственно к месту выхода источников по какому-то одному разлому.

Таким образом, действительные размеры очага разгрузки, если под нею понимать разгрузку гидротерм из третичных отложений, значительно больше той небольшой территории, где сконцентрированы выходы Паужетских источников. В него входит также участок западного крыла антиклинали, причем юго-восточная граница очага разгрузки отстоит от места выхода источников на несколько километров.

Анализ геологической обстановки и истории развития района в четвертичный период приводит к выводу, что выход Паужетских гидротерм находится в значительном удалении от возможных очагов нагрева. Это подтверждается данными разведки. В скважине Р-1 максимальные температуры — 170—180° наблюдаются на интервале от 120 до 350 м. Глубже происходит спад температуры: на глубине 800 м она не превышает 130—140°. Следовательно, по распределению температур в вертикальном разрезе выявляется поток сильно нагретых вод мощностью около 200 м. Этот поток отличается также по гидрохимическим показателям. Термальные воды из верхнего интервала, по сравнению с более глубоко залегающими водами, характеризуются несколько большей концентрацией хлористого натрия и меньшим содержанием сульфатов.

По геологическим данным, интенсивный нагрев термальных вод происходит, вероятнее всего, в недрах Камбального хребта, с которым, как указывалось в предыдущем разделе, связывается положительная температурная аномалия. Паужетские источники и паровые струи Камбального хребта могут быть объединены в одну большую термальную

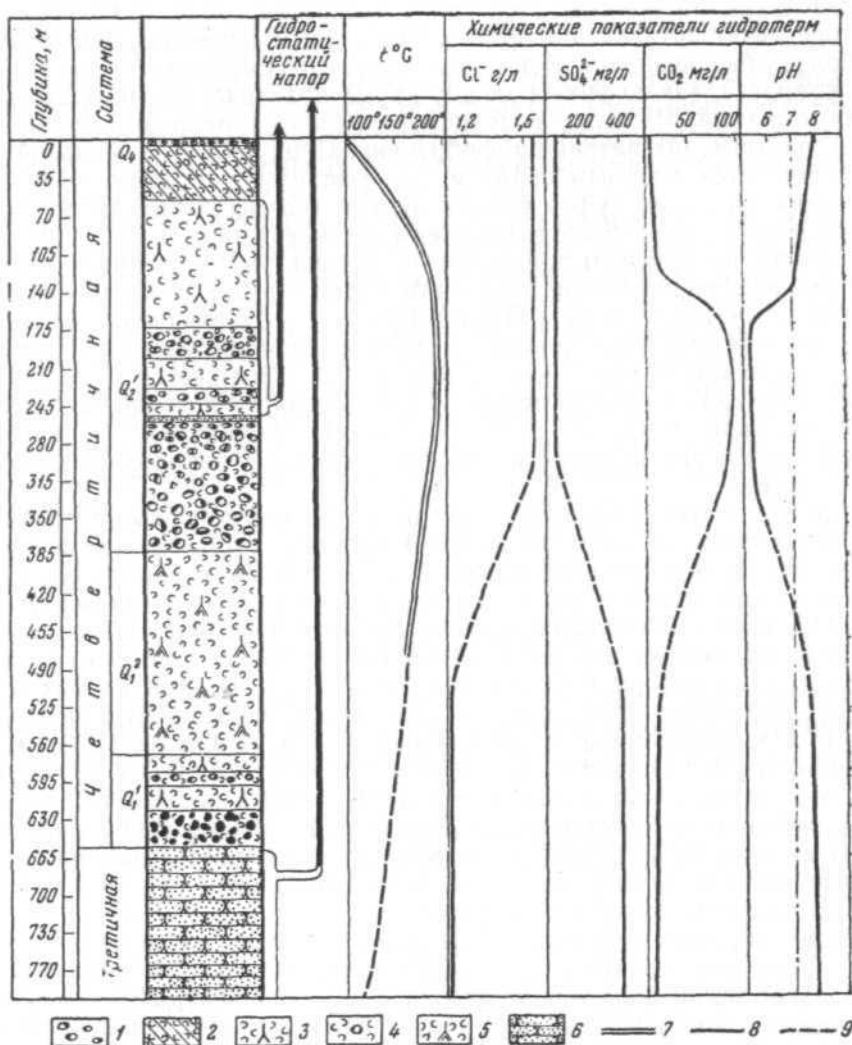


Рис. 3. Сводная характеристика скважины Р-1 на Паужетских источниках.

1— галечник; 2— пепловые дацитовые туфы; 3— агломератозые андезито-дацитовые туфы; 4— андезитовые туфобрекчии; 5— витрокристаллокластические дацитовые туфы; 6— алевриты и туфопесчаники; 7— температурная кривая; 8— кривые концентраций компонентов химического состава вод; 9— гипотетические кривые

зону. Отделенные друг от друга расстоянием в 7 км, они связаны почти непрерывной цепочкой прогретых и гидротермально измененных участков горных пород. Их связывают также Восточно-Паужетские паровые струи и выходы пара на Старом сольфатарном поле. Первые находятся на расстоянии 2,5 км, а вторые — 0,4 км на юго-восток от источников. Паужетские источники входят в систему крупного месторождения современных гидротерм, приуроченного к молодому вулcano-тектоническому поднятию. Деятельность гидротерм этого месторождения проявляется в полосе, совпадающей в общем с осевой зоной поднятия и вытянутой почти на 15 км при ширине 1—1,5 км.

Очаг разгрузки Паужетских гидротерм существует весьма длительное время. Его возникновение относится к последнему этапу крупных тектонических движений, который датируется временем образования

третьей надпойменной террасы р. Паужетки. На этом этапе произошло образование разломов на западном склоне Камбального хребта и оформились современные очертания гидрографической сети.

Таким образом, формирование Паужетского гидротермального месторождения тесно связано с общим развитием района в четвертичный период. Определяющая роль в этом процессе принадлежит вулканизму и тектонике. Молодое вулкано-тектоническое поднятие, возникшее в середине трога, стало центром гидротермальной деятельности; в нем сочетаются, с одной стороны, высокие температуры на глубине и, с другой — условия, обеспечивающие выход гидротерм на поверхность.

ПРИЧИНЫ И ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМ

Новые данные, полученные за последние годы при разведке месторождений современных гидротерм как в СССР, так и за рубежом, позволяют более основательно подойти к решению вопроса о причине и характере их движения. Среди проблем, связанных с изучением гидротермального процесса, этот вопрос является одним из центральных.

В ряде построений гидротермы рассматриваются как изолированная динамическая система, берущая свое начало у магматического очага. Такая позиция характерна для минералогов, конструирующих обстановку формирования гидротермальных месторождений полезных ископаемых. В качестве движущей силы в такой системе привлекается либо газово-паровой поршень, толкающий впереди себя столб сжиженных гидротерм, либо выжимающее давление горных пород и всасывание в связи с трещинообразованием. Известна противоположная точка зрения, высказываемая преимущественно гидрогеологами, согласно которой гидротермы являются составной частью природной водонапорной системы.

Анализ характера движения современных гидротерм показывает, что он зависит от конкретной геологической и термодинамической обстановки и в целом значительно сложнее, чем это предусматривается существующими гипотезами.

Выход Паужетских гидротерм на поверхность находится на дне огромной котловины, которую можно рассматривать как артезианский бассейн сравнительно небольших размеров, площадью около 1000 км². Гидростатический напор, обеспечивающий циркуляцию вод в бассейне и выход их на поверхность, создается на высоких лавовых плоскогорьях, окаймляющих трог. Строение бассейна осложнено поднятием в его центре, и в гидродинамическом отношении очаг разгрузки находится у подножья артезианского склона; это подтверждается данными разведочных работ. Последние показывают, что Паужетские гидротермы не только не принадлежат к какой-то особой, изолированной динамической системе, а, напротив, самым тесным образом связаны с пресными, сравнительно холодными, водами. Так, в 1,6 км к северу от активной термальной площадки, в туфовой толще на глубине 300 м вскрыты воды с температурой всего 74° и с минерализацией в 5 раз меньше по сравнению с Паужетскими водами. На этом участке, следовательно, происходит смешение высокотермальных вод с холодными пресными водами. Несмотря на большую разницу в температурах и минерализации, гидростатические напоры здесь существенно не отличаются от напоров в центральной части очага разгрузки. Аналогичная ситуация наблюдается на Новозеландском месторождении Вайракей, где в разных частях месторождения термальные воды разной температуры и минерализации принадлежат одной динамической системе.

Следует сразу же оговориться, что отнесение высокотемпературных гидротерм по динамическим показателям к артезианским водам никоим образом не решает вопрос об их происхождении. Речь идет о том, что гидротермы, какого бы происхождения они ни были, гидравлически не изолированы от остальных подземных вод района, а, наоборот, — находятся с ними в тесной связи. В своем движении они подчиняются той гидродинамической обстановке, которая господствует в данных условиях. В верхних горизонтах земной коры доминирующим является водонапорный режим. Поэтому естественно, что гидротермы вовлекаются именно в этот режим, в котором ведущими, определяющими факторами являются тектоника и геоморфология района.

Горное давление и связанный с ним упругий режим, который иногда привлекается для объяснения движения гидротерм, на современных месторождениях не проявляется. Упругий режим, как известно, исчерпывает себя через очень короткий период времени. Между тем наблюдения за Паужетскими источниками в последние 20 лет свидетельствуют о полной стабильности их дебита. Если же учесть, что очаги разгрузки существуют чрезвычайно длительное время, измеряемое тысячами и десятками тысяч лет, то необходимо признать, что горное давление в качестве фактора движения гидротерм в геологической истории практически не имеет никакого значения.

В областях активного вулканизма движение воды под землей испытывает сильнейшее влияние со стороны температурного фактора.

В определенных условиях высокая температура вносит лишь некоторые дополнительные черты в характер движения гидротерм. Действительно, на большинстве месторождений современных гидротерм буровые скважины вскрывают на глубине не пар и не пароводяную смесь, а сильно нагретую воду, находящуюся под значительным давлением. Так, на Паужетке, даже в центре термальной площадки на глубине выше 120—150 м, пластовое давление превышает возможную там упругость насыщенного пара. В скважине К-2, например, глубине 270 м соответствуют максимальная температура— 187° и пластовое давление 28 атм. Это почти на 15 атм выше упругости насыщенного пара при указанной температуре. На окраинах очага разгрузки скважины вскрывают только горячую воду на всех интервалах глубин.

Из приведенных выше данных следует, что в глубоких зонах очага разгрузки высокотемпературные гидротермы существуют только в жидкой фазе. Это положение справедливо также для глубоких зон всей водонапорной системы, в состав которой входят исследуемые гидротермы. В таких условиях давление пара, как фактор движения, полностью отсутствует. В этом отношении показательно распределение гидростатических напоров в скважине Р-1 на Паужетском месторождении. Напор термальных вод из среднечетвертичной туфовой толщи, обладающих температурой до 190°, не превышает 25 м над поверхностью земли. Что же касается термальных вод третичных отложений, то, несмотря на более низкую температуру, они характеризуются напорами до 35 м над землей.

Следовательно, в глубоких зонах движение гидротерм принципиально не отличается от движения обычных подземных вод. Оно подчиняется известному закону Дарси, выражаемому формулой:

$$V = KJ,$$

где V — скорость фильтрации,
 K — коэффициент
фильтрации,
 J — напорный градиент.

В приведенной формуле коэффициент фильтрации K пропорционален проницаемости горных пород и обратно пропорционален вязкости воды. Величина последней весьма существенно зависит от температуры. Так, вода с температурой 170° , по сравнению с холодной, обладает в 10 раз меньшей вязкостью.

Таким образом, высокотемпературные гидротермы обладают повышенной фильтрационной способностью. Мелкие поры и трещины, которые в обычных условиях практически не пропускают воду, при высоких температурах оказываются путями активной фильтрации. Поэтому можно полагать, что в областях активного вулканизма процессы водообмена протекают в целом значительно более активно, чем в других геологических регионах.

Влияние высоких температур на динамику гидротерм ярко проявляется в верхней зоне очагов разгрузки, при выходе гидротерм на поверхность. В этих условиях, в связи со снижением внешнего давления, получают развитие процессы парообразования. Гидравлический эффект парообразования заключается в понижении динамического уровня высокотемпературных вод; происходит как бы откачка термальной воды паром, чем, в частности, объясняется большой дебит пароводяных источников.

В районе Паужетской термальной площадки нижняя граница зоны парообразования, как показывает анализ термограммы по скважине Р-1, располагается в среднем на глубине 120 м. Однако действительная картина значительно сложнее. Глубина парообразования находится в функциональной зависимости от многих параметров, из которых главными являются температура гидротерм, фильтрационные свойства пород и характер путей движения пароводяной смеси. С повышением температуры растет упругость насыщенного пара, что дает воде возможность вскипать на большей глубине. Поэтому на месторождении Вайракей, где температура гидротерм достигает 270° , зона парообразования простирается в среднем до глубины 300—400 м. С другой стороны, парообразование зависит от гидравлических сопротивлений, возникающих по пути движения пароводяной смеси. Опытные работы на скважинах показали, что на Паужетском месторождении вскипание гидротерм в хорошо разработанных каналах и крупных трещинах может происходить значительно ниже 120 м и проникать до 200 м и даже глубже. В то же время по порам и мелким трещинам парообразование проникает очень неглубоко и происходит лишь в непосредственной близости от поверхности земли. Таким образом, зона парообразования в очагах разгрузки имеет весьма сложные очертания, которые определяются, в основном, системой трещиноватости и степенью разработанности каналов движения.

Пар, возникший в результате подземного кипения, в некоторых случаях сопровождает породившую его воду до самой поверхности земли. Это имеет место в буровых скважинах и в источниках с трубчатыми цементированными каналами. Обычно же в природных условиях часть пара отслаивается и приобретает возможность самостоятельного существования и движения. В крупных источниках Паужетки теплосодержание пароводяной смеси составляет 140—150 ккал/кг, т. е. на 20 ккал меньше, чем в буровых скважинах. Это означает, что примерно четвертая часть пара, образовавшегося под землей, отфильтровывается по дороге. Разведочными работами установлено, что паровые струи Грязевого озера и Старого сольфатарного поля представляют собой дериваты, отделившиеся от Паужетских гидротерм. Весьма вероятно, что такое же происхождение имеют паровые струи северной части Камбального хребта.

Характерно, что существование паровых струй тесно связано с деталями геологической обстановки. В районе Паужетских источников их выходы приурочены, как указывалось, к сводам антиклинальных складок и к куполообразным вздутиям, т. е. к таким структурам, которые исключают накопление холодных инфильтрационных вод. Немалую роль играет литология. В северной части Камбального хребта все паровые струи выходят лишь в тех местах, где отсутствует трещиноватый лавовый покров, который является верхним водоносным горизонтом.

Возникновение самостоятельных паровых струй в очагах разгрузки гидротерм обусловлено низкой вязкостью и малым удельным весом пара по сравнению с водой. Эти качества определяют его высокую миграционную способность и дают ему возможность проникать на очень высокие отметки, недоступные для термальной воды. Движение паровой фазы гидротерм подчиняется законам газовой динамики. В этом смысле она коренным образом отличается от движения воды, так как напорный градиент здесь создается благодаря разности величин упругости пара по пути его движения. Температурный фактор в этом случае выступает на передний план и становится определяющим.

Две динамические системы — водонапорная и паровая — находятся друг с другом в тесной гидравлической связи. Какие-либо изменения в одной системе неизбежно сказываются на другой.

Например, закупоривание паровыводящих каналов вызывает уменьшение глубины парообразования. Это создает перераспределение давлений в вертикальном разрезе и влечет за собой изменение движения в глубоких зонах.

Однако в областях активного вулканизма паровые струи далеко не всегда обязаны своим происхождением восходящим высокотемпературным водам. Они могут иметь и вполне самостоятельное существование. Таковы соффиони Лардерелло (Италия), где буровыми скважинами глубины 1800 м вскрывается перегретый пар. На указанной глубине установлена температура 330°. Это дает основание полагать, что на этом участке в земных глубинах возможно существование воды только в паровой фазе. Аналогичное положение существует, по-видимому, в недрах молодых вулканов; водонапорная система оказывается как бы прорванной паровыми столбами. В такой ситуации гидравлическая связь между двумя динамическими системами определяется конкретным соотношением гидростатического давления, с одной стороны, и упругостью пара — с другой. В зависимости от того, какое давление на данном гипсометрическом уровне больше, может происходить либо внедрение глубинных, в том числе возрожденных и ювенильных паров, в систему вод поверхностного происхождения, либо, наоборот, питание вулканических fumarol со стороны водонапорной системы. Состояние этих взаимоотношений зависит в конечном счете от геологической эволюции данного района.

Таким образом, высокотемпературные гидротермы отличаются многообразием форм движения. Если жидкая фаза входит в состав природных водонапорных систем, то движение паровой фазы подчиняется своим специфическим закономерностям. Все особенности динамики гидротерм не могут быть объяснены только каким-либо одним режимом. Поэтому при изучении областей активного вулканизма необходимо введение нового, более широкого понятия, а именно — понятия о единой гидравлической системе, в которую водонапорная и паровая динамические системы входят как взаимосвязанные составные части.

ХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМ В ОЧАГАХ РАЗГРУЗКИ

Исследования на Паужетском месторождении показали, что при разгрузке высокотемпературных гидротерм происходит дифференциация их химического состава. Она обусловлена переходом в паровую фазу газообразных соединений, находящихся первоначально в растворенном состоянии. При конденсации пара вблизи поверхности земли газы вторично растворяются в конденсате. В результате возникают новые типы вод, химический состав которых коренным образом отличается от первоначального исходного состава гидротерм.

Начало исследований в этом направлении было положено К. П. Флоренским (1958), показавшим, что достоверные сведения о химическом составе гидротерм могут быть получены только при строгом количественном учете всех компонентов системы «вода — пар — газ». Им же были выявлены основные направления химической дифференциации в этой системе.

Процессы химической дифференциации высокотемпературных гидротерм тесно связаны с особенностями их движения (рис. 4). Каждая динамическая обстановка характеризуется своим специфическим гидрохимическим обликом. В глубоких зонах очага разгрузки, где возможно существование гидротерм только в жидкой фазе, все газы находятся в растворе. В Паужетских гидротермах преобладающим газом является CO_2 , концентрация которого в водах на интервале глубин 200—300 м достигает 70 мг/л. Помимо него, в растворе присутствуют H_2S — до 10 мг/л, N_2 и редкие газы. Еще большая концентрация CO_2 — до 250 мг/л — отмечается на месторождении Вайракей. В верхней зоне очагов разгрузки, где начинается парообразование, происходит, практически полная дегазация воды. Газы выделяются в паровую фазу, причем по мере движения пароводяной смеси кверху дегазация прогрессирует, так как объем пара все более нарастает и парциальное давление газов в пузырьках пара снижается. В результате указанного процесса происходит расщепление исходного состава гидротерм на ионно-солевую и газовую составляющие. Это находит отражение в пароводяных источ-

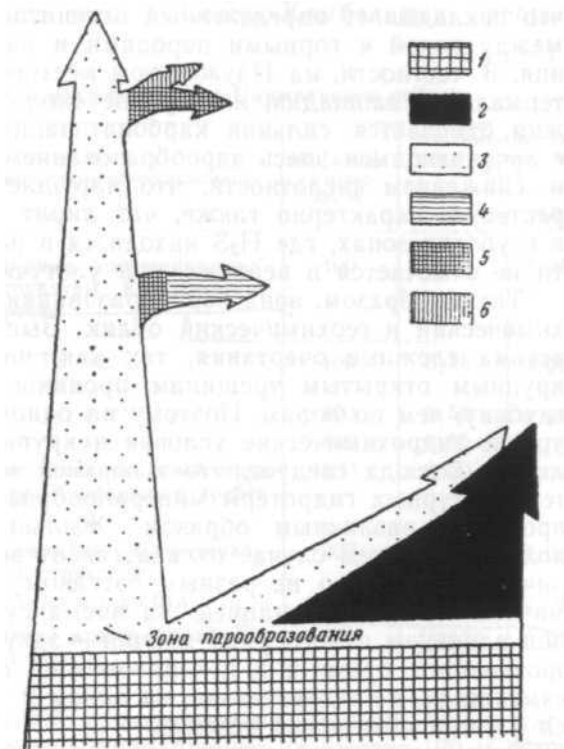


Рис. 4. Схема химической дифференциации высокотемпературных гидротерм Паужетского района. 1 — хлоридно-натриевые воды со слабокислой реакцией, содержащие CO_2 и H_2S ; 2 — хлоридно-натриевые воды со слабощелочной реакцией; 3 — паровые струи, содержащие CO_2 , H_2S , NH_3 и другие газы; 4 — гидрокарбонатные углекислые воды, образующиеся в результате конденсации пара в глубинных условиях; 5 — гидрокарбонатно-аммонийные воды, образующиеся при конденсации пара в поверхностных условиях; 6 — сульфатные воды грязевых грифонов

никах, в которых вода совершенно не содержит растворенных газов, а последние обнаруживаются в составе пара.

Дегазация гидротерм вносит существенные изменения в режим щелочности — кислотности растворов. Эксперименты показали, что в Паужетских водах с концентрацией CO_2 70 мг/л рН имеет значение 5,5 (при нормальной температуре), т. е. лежит в области слабокислой среды. Нейтральная точка (рН = 7) соответствует концентрации CO_2 25 мг/л и, наконец, дегазированная вода является слабо щелочной (рН = 7,8). Следовательно, кислотность гидротерм при переходе их из нижней зоны очага разгрузки в верхнюю довольно сильно снижается, что накладывает определенный отпечаток на ход химических реакций между водой и горными породами и на процессы минералообразования. В частности, на Паужетском месторождении, в центральной части термальной площадки, на глубине около 120 м в керне буровых скважин отмечается сильная карбонатизация. Это, по-видимому, связано с начинающимся здесь парообразованием, улетучиванием из воды CO_2 и снижением кислотности, что нарушает карбонатное равновесие в растворе. Характерно также, что пирит встречается преимущественно в глубоких зонах, где H_2S находится в растворенном состоянии, и почти не отмечается в верхних, при улетучивании сероводорода из воды.

Таким образом, зона парообразования в целом имеет особый гидрохимический и геохимический облик. Выше отмечалось, что она имеет весьма сложные очертания, так как парообразование в породах по крупным открытым трещинам проникает на значительно большую глубину, чем по порам. Поэтому на одном и том же гипсометрическом уровне гидрохимические условия в крупных трещинах и в порах различны. Отсюда следует, что в верхней зоне очагов разгрузки высокотемпературных гидротерм минералообразование в порах и трещинах протекает различным образом. Жильные минеральные ассоциации должны в общем случае отличаться от внутривещных, причем это отличие обусловлено не разным составом исходных растворов, а их химической дифференциацией. За время существования очага разгрузки под влиянием целого ряда причин — закупоривания каналов, усиления эрозивного вреза и т. д. — положение зоны парообразования может изменяться, а следовательно, на одном и том же участке могут меняться и гидрохимические условия.

Этот вывод необходимо, очевидно, учитывать при изучении минеральных месторождений гидротермального происхождения. Возможно, что в ряде случаев различные минеральные ассоциации во вмещающих породах и в жилах, а также разный минеральный состав внутренних и внешних частей жил обязаны своим происхождением не различным генерациям гидротермальных растворов, как это часто считают, а их дифференциации.

Концентрация газов в паровой фазе в целом определяется их исходной концентрацией в гидротермах на глубине. Это подтверждается исследованиями на пароводяных скважинах. Однако в природных паровых струях такое соответствие, как правило, не наблюдается. Так, в паровой фазе Паужетских источников газа содержится в несколько раз меньше, чем в паре из буровых скважин. С другой стороны, в паровых струях Старого сольфатарного поля концентрация газов значительно больше. Такое различие объясняется тем, что при ответвлении паровых струй в начальные стадии парообразования происходит также и отделение газов, к этому времени почти целиком выделившихся из воды. В связи с этим пар, образующийся из воды в дальнейшем и сопровождающий ее до поверхности земли, оказывается обедненным газами по сравнению с первыми порциями. Напротив, в ответвившихся паровых струях,

по мере приближения их к поверхности, происходит концентрирование газовой составляющей, так как часть пара по дороге конденсируется. При этом в жидкую фазу переходит также и часть газов, но, как показывает анализ конденсатов, всегда в меньшей пропорции, чем вода. Поэтому, чем больший путь предстоит пройти паровой струе от места ее зарождения до выхода на поверхность, тем в большей степени она становится богатой газами.

При исследовании паровых струй Паужетского района выявилась явная зависимость между гипсометрическим положением выхода паровых струй и концентрацией в них газов (табл. 1). Это особенно относится к CO_2 , концентрация которого в Северо-Камбальных паровых

Таблица 1

Концентрация CO_2 и H_2S в паровых струях Паужетского района

| Паровые струи | Геолого-структурное положение | Абс. отметка выхода, м | Концентрация газов в граммах на кг пара | |
|--|--|------------------------|---|----------------------|
| | | | CO_2 | H_2S |
| Паровая фаза Паужетских источников (Парящий № 1) | Подножье антиклинальной структуры Камбального хребта | 100 | 0,10 | 0,010 |
| Паровая фаза скв. К-2, глубина 38 м | То же | 100 | 0,15 | 0,010 |
| Паровая фаза скв. К-2, интервал 50—270 м | » » | 100 | 0,50 | 0,010 |
| Старое сольфатарное поле | » » | 140 | 0,35 | 0,035 |
| Восточно-Паужетские | Склон антиклинальной структуры Камбального хребта | 300 | 1,50 | 0,065 |
| Северо-Камбальные: | | | | |
| I группа | Сводовая часть антиклинальной структуры | 900 | 7,90 | 0,080 |
| II группа | Камбального хребта | 900 | 2,65 | 0,060 |
| Верхне-Кошелевские фумаролы | Древний кратер вулкана Кошелева | 1400 | Около 15,00 | 0,500 |

струях, выходящих на высоте 900 м, во много раз больше, чем в паре Паужетской термальной площадки, находящейся на высоте 100 м. Вместе с тем паровые струи с максимальной концентрацией газов в геолого-структурном отношении приурочены к сводовой части антиклинали Камбального хребта, тогда как у ее подножья, на расстоянии 5—7 км от свода, концентрация газов в паре наименьшая. Поскольку с недрами этой структуры связывается положительная температурная аномалия, естественно предположить, что повышенные концентрации газов в ее сводовой части связаны не только с процессами концентрирования в паровых струях, но и с более активным на этом участке термометаморфизмом горных пород.

Крайне характерно, что паровые струи северной части Камбального хребта, не связанные непосредственно с процессами вулканизма, и по составу и по концентрации газов принципиально не отличаются от низкотемпературных фумарол вулкана Кошелева. Никаких специфических компонентов газового состава в этих фумаролах, типичных для большого количества вулканов, не обнаруживается. Так же, как и в паровых струях Паужетских гидротерм, преобладающими газами здесь являются CO_2 и H_2S , а их повышенная концентрация, регистрируемая к тому же на очень большой высоте, как было показано, не может служить обоснованием их особого, магматического происхождения. Это

Химический состав гидро

| Компоненты | Скв. Р-1 на Паужетских источниках, интервал 120—196 м* | | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------------------------|--------|---|--------|--------|
| | Состав воды, T=100°C | | | Состав конденсата пара, T=100°C | | |
| | г/л | мг/экв | экв, % | г/л | мг/экв | экв, % |
| Катионы | | | | | | |
| NH ₄ ⁺ | 0,0004 | 0,02 | 0,04 | 0,0120 | 0,67 | 34,91 |
| Na ⁺ + K ⁺ | 1,0540 | 45,85 | 94,45 | 0,0160 | 0,70 | 36,45 |
| Ca ²⁺ | 0,0422 | 2,11 | 4,34 | Следы | — | — |
| Mg ²⁺ | 0,0070 | 0,57 | 1,17 | | | |
| Fe ²⁺ | — | — | — | 0,0150 | 0,55 | 28,64 |
| Сумма . . . | 1,1036 | 48,55 | 100,0 | 0,0430 | 1,92 | 100,0 |
| Анионы | | | | | | |
| Cl ⁻ | 1,6380 | 46,19 | 95,15 | Не обнаружено | — | — |
| SO ₄ ²⁻ | 0,0854 | 1,77 | 3,64 | 0,0120 | 0,25 | 13,02 |
| HCO ₃ ⁻ | 0,0360 | 0,59 | 1,21 | 0,1036 | 1,67 | 86,97 |
| Сумма . . . | 1,7594 | 48,55 | 100,0 | 0,1156 | 1,92 | 100,0 |
| Недиссоциированные молекулы | | | | | | |
| H ₂ SiO ₃ | 0,1690 | — | — | Не обнаружено | — | — |
| CO ₂ | 0,0112 | — | — | 0,0560 | — | — |
| H ₂ S | — | — | — | 0,0150 | — | — |
| Общая минерализация | 3,2 | — | — | 0,26 | — | — |
| Формула химического состава | | $M_{3,2} \frac{Cl_{95}}{Na_{04}}$ | | $M_{0,28} \frac{HCO_{87}^3 SO_{13}^4}{Na_{38} NH_{35}^4}$ | | |
| pH | 8,0 | | | 5,5 | — | — |

* Аналитик Е. П. Рябичкина.

** Аналитик И. Х. Забелышинская.

обстоятельство подтверждает, по-видимому, представление, что сходные термодинамические условия в верхних горизонтах земной коры, независимо от того, обусловлены они внедрением магмы или нет, порождают примерно однотипные ассоциации газов.

Изучение паровых струй в районе Паужетки показало, что их температура почти точно соответствует точке насыщения. Это предопределяет относительно легкую конденсацию пара по пути его движения. В общем случае конденсация пара в нижних горизонтах должна сопровождаться относительно большим растворением газов, содержащихся в паровой фазе, так как в этих условиях их парциальная упругость выше. В верхних горизонтах содержание растворенных газов в конденсатах убывает.

Поскольку в паре присутствуют такие химические активные газы, как CO₂, H₂S NH₃, то при конденсации почти сразу же получаются

терм Паужетского района

| Зона конденсации пара Старого сольфатарного поля, вода из скважины с глубины 6,1 м. T=100°C** | | | Вода из источника Медвежьего, T=26°C** | | |
|--|--------------------------------------|--------|---|---|--------|
| г/л | мг/экв | экв. % | г/л | мг/экв | экв. % |
| 0,0120 | 0,66 | 16,9 | 0,0012 | 0,66 | 0,1 |
| 0,0021 | 0,09 | 2,3 | 0,0676 | 2,94 | 18,8 |
| 0,0592 | 2,96 | 75,6 | 0,0948 | 4,74 | 25,0 |
| 0,0024 | 0,20 | 5,2 | 0,1296 | 10,66 | 56,0 |
| Не определялось | — | — | 0,0005 | — | — |
| 0,0757 | 3,91 | 10,0 | 0,2937 | 19,02 | 99,9 |
| 0,0071 | 0,20 | 5,1 | 0,0593 | 1,67 | 8,8 |
| 0,1590 | 3,31 | 84,6 | 0,1134 | 2,35 | 12,3 |
| 0,0244 | 0,40 | 10,3 | 0,9150 | 15,00 | 78,9 |
| 0,1905 | 3,91 | 100,0 | 1,0877 | 19,02 | 100,0 |
| 0,0650 | — | — | 0,1137 | — | — |
| Не обнаружено | — | — | 0,0056 | — | — |
| Не обнаружено | — | — | 0,293 | — | — |
| Не обнаружено | — | — | Не обнаружено | — | — |
| 0,31 | — | — | 1,8 | — | — |
| | $M_{0,31} \frac{SO_4^{85}}{Ca_{76}}$ | | | $M_{1,8} \frac{HCO_3^{79}}{Mg_{68}Ca_{25}}$ | |
| 6,7 | | | 6,4 | | |

ионно-солевые растворы преимущественно гидрокарбонатно-аммонийного состава (табл. 2). Источники с таким составом воды обычно отмечаются в непосредственной близости от выхода паровых струй. Дальнейшая химическая эволюция этих растворов протекает в различных условиях по-разному. В поверхностных условиях наблюдается, как правило, замещение иона NH_4 металлами Ca, Mg, выщелачиваемыми из горных пород, и одновременное обогащение ионом SO_4 . В результате получаются сульфатные воды, характерные для грязевых грифонов термальных площадей. Воды такого же состава иногда вскрываются неглубокими скважинами в верхней зоне конденсации пара. Точные сведения о том, какими путями происходит химическая эволюция конденсатов на нижних горизонтах, отсутствуют. Однако можно предполагать, что в этих условиях ион HCO_3 остается в растворе, так как не происходит

улетучивания CO_2 . Действительно, состав воды в некоторых углекислых источниках весьма близок по составу анионов к начальному составу конденсатов.

Таким образом, химическая дифференциация высокотемпературных гидротерм в очагах разгрузки приводит в конечном счете к возникновению новых типов вод. Такие формально разные типы вод, как хлоридные, гидрокарбонатные и сульфатные оказываются генетически связанными. Следует только отметить, что пути выявленной химической дифференциации гидротерм являются чистыми линиями процесса, которые в природной обстановке часто затушевываются и осложняются.

Настоящая статья освещает в основном условия, которые существуют при выходе высокотемпературных гидротерм на поверхность. Это объясняется тем, что в настоящее время, буровые работы, которые доставляют наиболее ценный в научном отношении материал, сосредоточены именно на этих участках. Между тем полные сведения о течении современного гидротермального процесса могут быть получены лишь при изучении с помощью бурения всего месторождения в целом, включая также и глубокие зоны в очаге нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

- Бетехтин А. Г. О причинах движения гидротермальных растворов. В сб. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во АН СССР, 1955.
- Иванов В. В. Основные закономерности формирования распространения термальных вод Камчатки. Труды Лаб. вулканол. АН СССР, вып. 13, 1958.
- Набоко С. И. Вулкан Кошелева и его состояние летом 1963 г. Бюлл. Камч. вулк. станции, № 23, 1954.
- Набоко С. И. Гидросольфатары Дикого Гребня. Бюлл. Камч. вулк. станции, № 22, 1954.
- Овчинников А. М. Закономерности распространения и формирования углекислых гидротерм. Тезисы докладов на Первом Всес. совещ. по геотермии. М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Пийп Б. И. Термальные ключи Камчатки. М., Изд-во АН СССР, 1937. Флоренский К. П. К вопросу об изучении вулканических газов. Труды Лаб. вулканол. АН СССР, вып. 13, 1958.
- Grange L. J. Geothermal Steam for Power in New Zealand. Wellington, 1955.
- Mazzoni A. The Steam Vents of Tuscany and the Larderello Plant, Bologna, 1954.
- Smith J. H. Production and Utilization of Geothermal Steam, N. Z. Engineering, 13(10), 1958, Wellington.